

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ

Вадченко С.Г.\*, Суворова Е.В., Рогачев А.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\* [vadchenko@ism.ac.ru](mailto:vadchenko@ism.ac.ru)

Разработанные ранее математические и физические модели гетерогенного горения, иллюстрирующие эстафетный или квазигомогенный механизм передачи тепла [1-6], (подробный обзор также дан в работе [7]), не получили достаточной наглядной интерпретации на простых экспериментальных моделях. Модели, предложенные в работах [8-10], не могут учитывать пористость или разбавление смеси инертной добавкой. В данной работе предложена двумерная экспериментальная модель гетерогенного горения. В этой модели образцы конструируются из отдельных цилиндрических микротаблеток, которые играют роль частиц в реальных смесях. Представленная модель позволяет располагать таблетки с плотной и неплотной упаковкой, моделировать влияние инертного разбавителя и перколяционный механизм горения. Кроме того, эта модель позволяет изменять условия тепло - и массопередачи на «боковых» границах образцов за счет укладки на них инертных таблеток. Таблетки могут также укладываться на боковую поверхность и составлять несколько слоев. На рис. 1 показаны различные способы укладки микротаблеток, «вакансии» или поры и инертные частицы могут быть расположены регулярным или хаотическим способом.

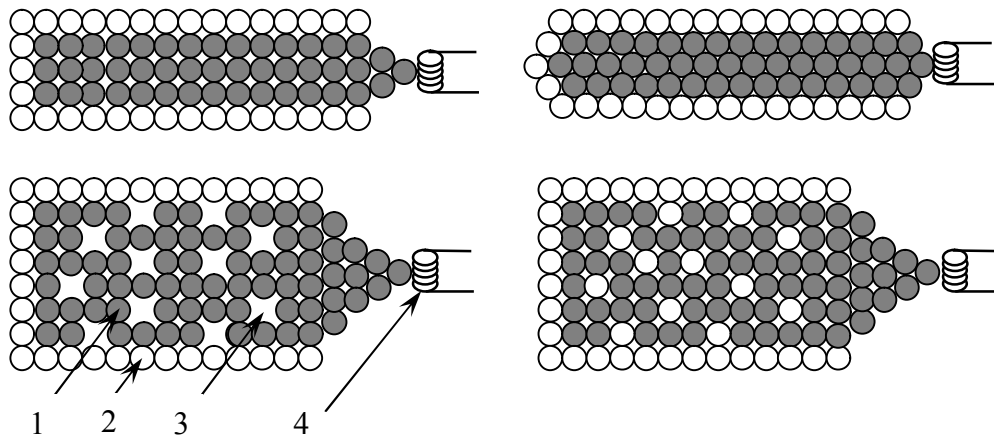


Рис.1. Схемы плотной и неплотной укладки микротаблеток. 1– исходная таблетка, 2 – инертная таблетка, 3 – пора, 4 – инициирующая спираль.

a	b	c	d
---	---	---	---

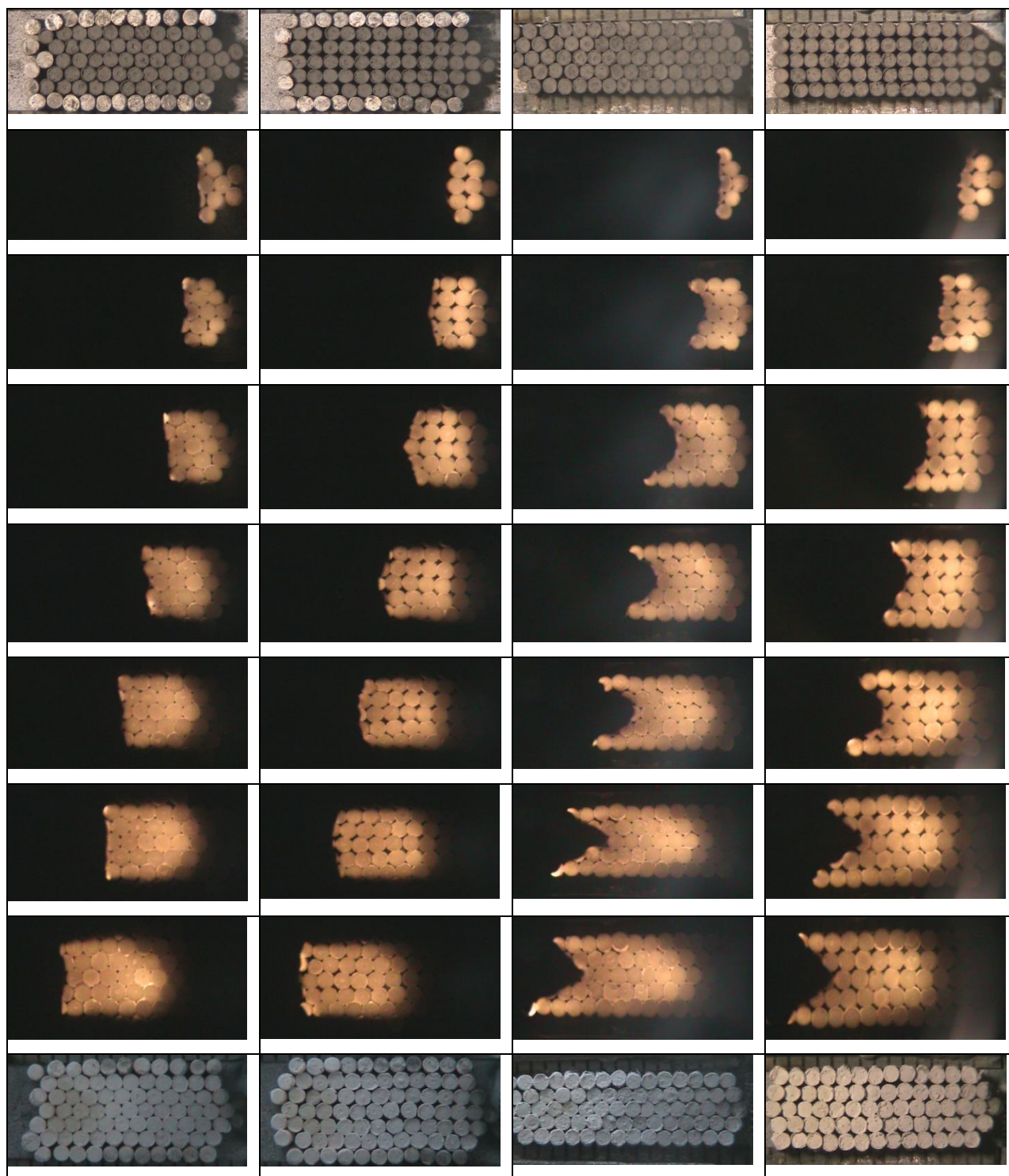


Рис.2. Исходные образцы при различных способах их конструирования, кадры видеосъемки и вид образцов после горения. а, b  $-\Delta t=1,2$  с; с, d  $-\Delta t=1$  с.

Таблетки диаметром 1 мм и высотой 1,3 мм прессовали из порошка гафния марки ГФН-1. Плотность образцов, спрессованных в разное время в течение 3 месяцев, составляет  $7,073 \pm 0,005$  г/см<sup>3</sup>, или 0,536 от теоретической плотности. Для «разбавления» и бронирования использовали сгоревшие в предыдущих экспериментах таблетки.

Эксперименты проводили на воздухе. Процесс горения записывали на видеокамеру с частотой 50 кадров в секунду. Переходные процессы при передаче горения между таблетками фиксировали на компьютере с помощью фотодатчика, направленного на образец через щелевой коллиматор.

На рис. 2 показаны исходные образцы, кадры процесса горения и образующиеся продукты. При бронировании боковой поверхности фронт горения практически прямой, при открытых боковых поверхностях фронт горения изгибается. Это может быть связано как с фильтрационными затруднениями, так и с теплоотдачей в бронирующий слой таблеток.

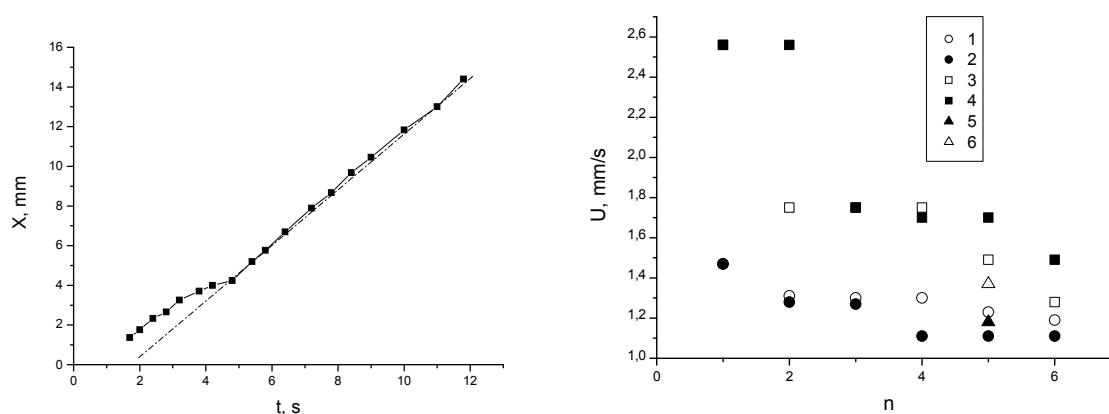


Рис.3. Зависимость координаты фронта при горении одного ряда таблеток.

Рис.4. Зависимость скорости горения от числа рядов таблеток, способа их укладки и «бронирования» образца: 1- бронированный, плотноупакованный; 2- бронированный, не плотноупакованный, 3- не бронированный, плотноупакованный; 4- не бронированный, не плотноупакованный; 5 - бронированный, плотноупакованный с инертным «разбавителем»; 6 - бронированный, не плотноупакованный, «пористый».

В пользу последнего предположения говорят эксперименты с горением плоских лент, полученных прокаткой смесей  $Ti+xV$  [11], несмотря на принципиальное различие систем твердое – газ и твердое – твердое. На начальных участках горение практически во всех случаях не стационарное, причем это проявляется даже при горении образцов, состоящих из одного ряда таблеток (Рис.3). Поэтому средняя скорость горения образцов определялась на стационарном участке по осевой линии.

Влияние разбавления и пористости иллюстрируется на рис 4 точками 5 и 6. Разбавление и пористость приводят к уменьшению скорости горения по сравнению с аналогичными не разбавленными и «беспористыми» образцами. Это обусловлено

поверхностным режимом горения. Переходный процесс при передаче горения от одной таблетки к другой в общем случае включает три стадии: вспышка при окончании горения, депрессия, вспышка при начале горения следующей таблетки. В зависимости от качества контакта между таблетками, определяемого усилием сжатия между ними и способом укладки, некоторые стадии не наблюдаются. На Рис.5 показана запись ЭДС фотодатчика при прохождении волны горения по ряду лежащих таблеток. Вертикальными линиями показаны границы таблеток. В данном случае на границах проявляются все стадии переходного процесса.

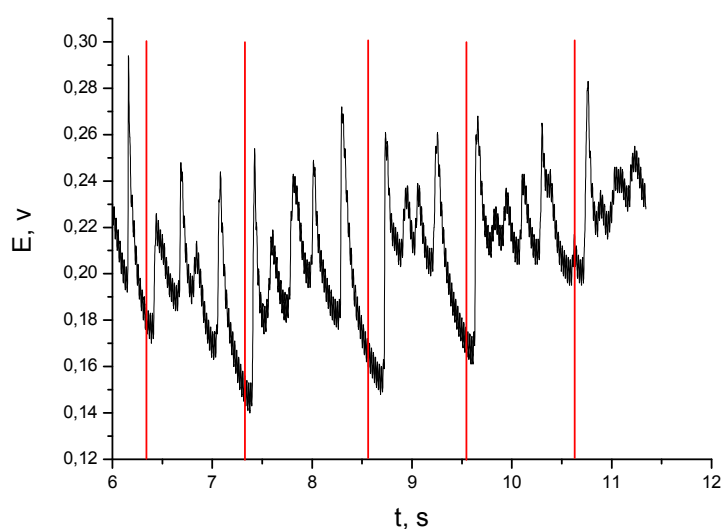


Рис. 5. Изменение яркости свечения при горении ряда таблеток

### **Заключение**

Предложена экспериментальная модель, позволяющая наглядно имитировать процесс гетерогенного горения с учетом пористости, разбавления, плотности упаковки. Данный подход может быть полезен при моделировании техногенных и лесных пожаров.

### **Литература**

1. Б.И. Хайкин К теории процессов горения в гетерогенных конденсированных средах. Процессы горения в химической технологии и металлургии. Под ред. А.Г. Мержанова, ОИХФ, 1976, с. 227-244.
2. А.Г. Мержанов Распространение твердого пламени в модельной гетерогенной системе. Докл. АН, (1997), №4, с. 505-507.

3. И.А Филимонов. Влияние передачи тепла излучением на распространение волны горения по модельной гетерогенной системе. *Физика горения и взрыва*. (1998). Т. 34. № 3, с. 69-71
4. A.G. Merzhanov, A.S. Rogachev. Discrete heat waves in active heterogenius media: basic principles and introduction to the theory. *Russian J. Phys. Chem.* (2000), V.74, suppl.1, P.S20-S27.
5. П.М. Кришеник, А.Г. Мержанов., К.Г. Шкадинский. Нестационарные режимы превращения многослойных систем. *Физика горения и взрыва*. (2002). Т.38. № 3. С. 70-79.
6. П.М Кришеник , Н.И. Озерковская, К.Г. Шкадинский. Распространение волн горения в слоистой гетерогенной системе. *Химическая физика*. (2006). Т. 25. № 7. С. 52-57
7. A.S. Mukasyan, A.S. Rogachev. Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures. *Progress in Energy and Combustion Science*. (2008). 34. 377–416.
8. С.Г. Вадченко, А.Г. Мержанов. Гетерогенная модель распространения пламени. *Докл. РАН*. (1997), т. 352, №.4, с.487-489.
9. С.Г. Вадченко. Безгазовое горение модельной многослойной системы (горение дисков с зазором). *Физика горения и взрыва*. (2001), Т.37. №2, с. 42-50.
10. С.Г. Вадченко. Безгазовое горение модельной многослойной системы (горение дисков без зазора). *Физика горения и взрыва*. (2002), Т.38. №1, с. 55-60.
11. С.Г. Вадченко. Зависимость скорости горения лент из смесей  $Ti + xB$  от концентрации бора. *Физика горения и взрыва*, 2019, т. 55, № 2, с.1-7.